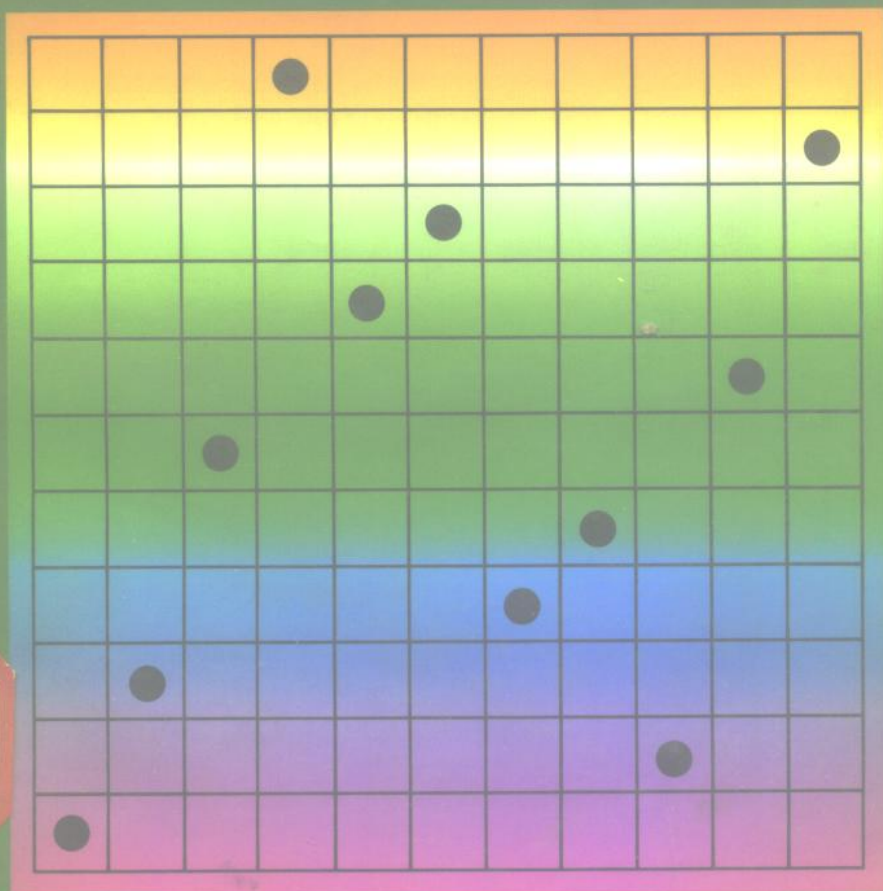


G F G Y C B S

跳频通信地址编码理论

TIAOPIN TONGXIN DIZHI
BIANMA LILUN

梅文华 杨义先 编著



DX11/08
图书在版编目(CIP)数据

跳频通信地址编码理论/梅文华,杨义先编著. —北京:
国防工业出版社, 1996. 1

ISBN 7-118-01488-5

I 跳… II. ①梅… ②杨… III. 通信系统-地址-编码
理论 IV. TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 10529 号

国防工业出版社发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮发代号 160044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 6% 165 千字

1996 年 1 月第 1 版 1996 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 9.70 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

前 言

通信领域的电波斗争愈演愈烈,使得惯用的定频通信受到严重威胁。为了保证己方正常可靠的通信,一种抗干扰通信体制——跳频通信系统应运而生。可以说,在未来战争中,如果通信电台不采用抗干扰措施,就没有生存能力。海湾战争中的高科技电子战已经证明了这一点。

西方国家早在 60 年代就开始进行一系列的抗干扰通信体制和抗干扰技术的理论研究。到 80 年代初,大部分抗干扰技术都已开始陆续使用在新的通信装备和系统中,而且在不断改进和完善。1982 年,英国在马尔维纳斯群岛(福克兰群岛)战争中使用了分米波跳频电台。1991 年的海湾战争中,多国部队为提高通信的抗截获、抗干扰能力,普遍使用了跳频电台:美国的 Sincgars-V 系列超短波跳频电台和联合战术信息分布系统 JTIDS,法国的 TRC-950 以及英国的美洲虎 Jaguar-V 等超短波跳频电台,有效的抗干扰措施保障了己方的正常通信。

实现跳频通信需要解决三个关键技术问题:频率合成、同步和地址编码(跳频序列设计)。跳频序列的性能对跳频通信系统的性能有着决定性的影响,如果跳频序列设计得不好,即使跳频电台的硬件电路设计得非常出色,也达不到抗干扰的目的。寻求和设计具有理想性能的跳频序列是研究跳频通信系统的重要课题之一。本书正是要探讨跳频通信地址编码理论的有关知识。

全书共分九章。第一章介绍研究的背景和有关概念。第二章介绍跳频通信地址编码的理论限制。跳频序列族的几个主要参数,如频率数目、序列长度、序列数目和汉明相关之间是相互约束的,研究其约束关系,可以为跳频序列族的构造提供指导,也可以为评

价各种构造方法的性能提供判别标准。第三章~第八章分别介绍 m 序列、RS 码、非重复序列、M 序列、广义 Bent 函数序列、宽间隔跳频序列等在跳频通信系统中的应用,分析它们的汉明相关性能。第九章介绍研究跳频通信地址编码理论所需的数学基础。

为方便读者,在附录一中,给出 5000 以内的素数及其最小原根表;另外,本书阐述的跳频通信地址编码理论没有考虑多普勒频移的因素,读者如果涉及这方面的研究,可查阅附录二中所列有关参考文献。

本书第一作者感谢国防科技大学周兆祺教授的悉心指导,感谢国防科技大学李情与副教授、陈先福副教授、北方交通大学李承恕教授、电子科技大学洪福明教授、中国科技大学研究生院曾肯成教授、北京理工大学匡镜明教授的鼓励和帮助,感谢南京通信工程学院李斌博士的支持,感谢单位领导和同事的鼓励和支持。

跳频通信地址编码理论是一门兴起不久的研究课题,目前还没有一本经典的著作问世,待研究的问题不少。同时,由于作者水平所限,缺点错误在所难免,欢迎批评指正。

1995 年 2 月

内 容 简 介

本书介绍跳频通信系统地址编码理论的有关知识。全书共分9章:1. 跳频通信与地址编码概述;2. 跳频通信地址编码的理论限制;3. 基于 m 序列构造跳频序列族;4. RS 码作为跳频序列族;5. 非重复跳频序列族的构造;6. 基于 M 序列构造非线性跳频序列族;7. 基于 Bent 函数构造跳频序列族;8. 宽间隔跳频序列族的构造方法;9. 有关数学基础。本书内容深入浅出,力求理论推导与工程应用相结合。

本书可供从事通信、雷达、电子对抗、应用数学等方面研究的广大工程技术人员参考,亦可作为大专院校有关专业的教学参考书。

目 录

第一章 跳频通信与地址编码概述	1
1.1 通信领域的电波斗争	1
1.2 跳频通信系统概述	2
1.3 地址编码理论概述	4
1.4 跳频通信地址编码理论的发展	14
参考文献	15
第二章 跳频通信地址编码的理论限制	16
2.1 给定频隙数目和序列长度条件下汉明相关的下限	16
2.2 限定汉明相关条件下序列数目和序列长度的理论限	21
2.3 非重复跳频序列族的理论限制	24
2.4 宽间隔跳频序列族的理论限制	27
2.5 多址组网时限定相关条件下用户数量的理论限制	30
参考文献	31
第三章 基于 m 序列构造跳频序列族	33
3.1 m 序列的基本原理和基本特性	33
3.2 m 状态序列 $SM(2^m)$ 作为跳频序列	45
3.3 构造最佳跳频序列族的 Lempel-Greenberger 模型	49
3.4 构造最佳跳频序列族的非连续抽头模型	52
3.5 构造最佳跳频序列族的一般模型	57
3.6 非线性化方法	63
参考文献	65
第四章 RS 码作为跳频序列族	66
4.1 纠错编码的基本原理	66
4.2 RS 码的基本原理	68
4.3 RS 码的挑选	70
4.4 RS 码作为跳频序列的性能	74
4.5 有限域算术运算的实现	77
4.6 RS 跳频编码的硬件实现	80

参考文献	81
第五章 非重复跳频序列族的构造	82
5.1 非重复跳频序列的数量	82
5.2 一次重合的非重复跳频序列族	84
5.3 k 次重合的非重复跳频序列族	95
参考文献	103
第六章 基于 M 序列构造非线性跳频序列族	105
6.1 M 序列的构造方法	105
6.2 M 状态序列作为跳频序列	112
6.3 基于 M 序列的抽头选取法	113
6.4 非线性跳频序列族的构造	115
参考文献	118
第七章 基于 Bent 函数构造跳频序列族	119
7.1 q 元 Bent 函数	119
7.2 基于 q 元 Bent 函数构造跳频序列族	131
7.3 Bent 跳频序列族的线性复杂度分析	139
参考文献	143
第八章 宽间隔跳频序列族的构造方法	145
8.1 宽间隔跳频的意义	145
8.2 去中间频带法构造宽间隔跳频序列族	146
8.3 对偶频带法构造宽间隔跳频序列族	150
8.4 一次重合的宽间隔跳频序列族	153
8.5 JTIDS 系统中的宽间隔要求和实际情况	160
参考文献	164
第九章 有关数学基础	165
9.1 同余理论	165
9.2 域及域上的多项式	179
参考文献	190
附 录	191
附录一 素数及其最小原根表(5000 以内)	191
附录二 有关参考文献	194

第一章 跳频通信与地址编码概述

通信领域的电波斗争愈演愈烈,使得惯用的定频通信受到严重威胁,一种具有抗干扰能力的跳频通信系统应运而生。实现跳频通信需要解决三个关键问题:频率合成、同步、地址编码。本书将系统地介绍跳频通信地址编码的理论和技術,作为全书的基础,下面首先介绍研究的背景和有关概念。

1.1 通信领域的电波斗争

无线电通信建立迅速,便于机动,能与运动中的、方位不明的以及被敌人分割或被自然障碍阻隔的部队建立通信联络。它广泛应用于地面、航空、航海、宇宙航行通信中,是保障现代作战指挥的主要通信手段,特别是在对飞机、舰艇、坦克等运动目标进行指挥时,甚至是唯一的通信手段。

在无线电通信过程中,通信系统内的发射机向空间辐射载有信息的无线电信号,通信对象的接收机从复杂的电磁环境中检测出这些有用信号。这种开放式的发射和接收通信信号的特点,使得无线电信号易被敌人截获、测向和干扰。

削弱或破坏敌方无线电通信系统的使用效能和保护己方无线电通信系统发挥正常效能而采取的措施和行动,称为无线电通信对抗,简称通信对抗。

通信对抗是电子对抗的重要组成部分,其实质是敌对双方在通信领域内为争夺无线电频谱控制权而展开的电波斗争。通信对抗主要包括侦察、干扰和电子防御。无线电通信侦察是使用侦察设备搜索截获敌方无线电通信信号,对信号进行测量、分析、识别、测

向和定位,以获取信号频率、电平、调制样式等技术参数以及电台位置、通信方式、通信网结构和属性等情报。无线电通信干扰是使用无线电通信干扰设备发射干扰信号,破坏和扰乱敌方的无线电通信,是通信对抗中的进攻手段。无线电通信电子防御是采用反侦察、反干扰措施,保障己方无线电通信系统的正常工作。由于无线电通信保密技术的改善,想从敌方通信信号中及时获取军事情报已变得十分困难,因此,通信干扰成为通信对抗的重要手段。

一种有效的抗干扰措施是采用扩展频谱通信技术。扩展频谱通信是一种利用与信息无关的伪随机码使射频信号频带宽度远大于信息信号(基带信号)频带宽度的通信方式,简称扩频通信。扩频通信的射频信号频带宽度,可扩展到信息信号频带宽度的数倍乃至数千倍。扩频通信可分为直接序列扩频、跳频、跳时等基本方式。经直接序列扩频方式扩频后的信息信号功率分散在很宽的频带内,隐蔽在噪声中,以隐蔽方式对抗通信中的干扰;经跳频方式扩频后的信息信号频率在较宽的频率范围内跳变,以躲避方式对抗通信中的干扰。

扩频通信具有一系列优点:

(1)抗干扰能力强 能在干扰环境中,通过分散功率或跳频等方式完成信息传输,达到抗干扰的目的。

(2)低截获率 直接序列扩频的射频信号功率分散,淹没在噪声中;跳频信号的频率在较宽的频带内跳变,不易被敌方截获。

(3)可用作码分多址通信 在通信网中,采用不同的码序列作为地址码,发信端根据接收端的地址码选择通信对象。

(4)有一定的保密性。

尤其是跳频通信以其良好的抗干扰性能和多址性能引起了人们很大的重视,目前正处在大量涌向战术战场用户市场的浪潮上。

1.2 跳频通信系统概述

跳频通信主要用于战术无线电通信,其工作方式一般以话音

为主,也可传输数据。

跳频通信系统的主要工作原理是:在发信机中,输入的信码对频率为 f_c 的载波进行调制,得到带宽为 B_m 的调制信号。独立产生的跳频序列控制频率合成器,在不同的时隙内输出频率跳变的本振信号。用它对调制信号进行变频,使变频后的射频信号频率伪随机地跳变,即为跳频信号。跳频信号带宽为 B_c 。在收信机中,本地跳频序列控制频率合成器,使输出的本振信号频率随发方频率相应地跳变。跳变的本振信号,对接收到的跳频信号进行变频,将频率搬回到 f_c ,实现解跳。解跳后的调制信号,在本地载波作用下,经解调后,恢复出信码。

跳频通信系统的原理示意图如图 1.1 所示。

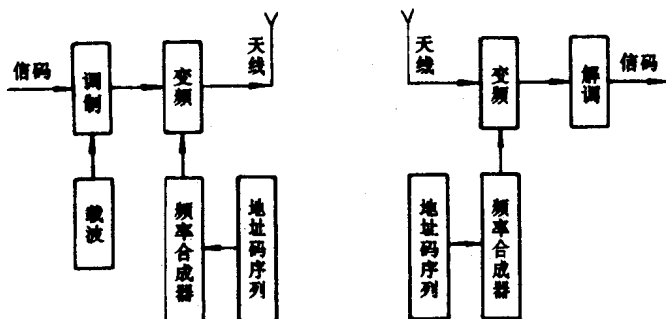


图 1.1 跳频通信系统原理示意图

射频信号在噪声环境中,经过收信机解扩。在输出端信噪比得到改善,其改善程度称为跳频通信系统的处理增益 G_p 。它等于跳频信号带宽 B_c 与调制信号带宽 B_m 的比值,即 $G_p = B_c / B_m$,是衡量跳频通信系统抗干扰能力的一个重要指标。

跳频通信系统还有一些特殊的性能指标:跳频频段宽度、频隙数目、跳频速率、组网数量、初始同步建立时间、跳频密钥量等。

与传统的通信方式相比,跳频通信系统具有如下主要特点:

(1) 抗干扰能力强 在电子战环境中,跳频通信系统是一种抗干扰能力较强的无线电通信系统,能有效地抗频率瞄准式干扰;只

要跳变的频隙数目足够多,跳频范围足够宽,也能较好地抗宽频带阻塞式干扰;只要跳变速率足够高,就能有效地躲避频率跟踪式干扰。跳频电台跳变的频隙数可达数千个。频率跳变的速率通常每秒数次至数千次。

(2)具有多址组网能力 利用跳频序列的正交性,可构成跳频码分多址系统,共享频谱资源。在通信网中,采用不同的跳频序列作为地址码,发信端可根据接收端的地址码选择通信对象。

(3)具有抗衰落能力 载波频率的快速跳变,具有频率分集的作用,只要跳变的频率间隔大于衰落信道的相关带宽,并且跳频驻留时间(时隙宽度)又很短的话,跳频通信系统就具有抗衰落的能力。

(4)易于与窄带通信系统兼容 从宏观看,跳频通信系统是一种宽带系统;从微观看,它又是一种瞬时窄带系统。跳频通信系统可以使用固定频率工作,因此,能与普通电台互通信息。普通电台加装抗干扰的跳频模块,也可以变成跳频电台。

(5)具有一定的保密能力 载波频率的快速跳变,使得敌方难以截获信息;即使敌方截获了部分载波频率,由于跳频序列的伪随机性,敌方也无法预测跳频电台将要跳变到哪一频率。

由于跳频通信体制具有上述主要特点,在战术无线电通信中得到了广泛应用。1971年,美国开始研究超短波波段跳频电台,接着英国也进行了研制,70年代末开始生产、使用。1982年,英国在马尔维纳斯群岛(福克兰群岛)战争中使用分米波跳频电台。1991年,美军在海湾战争中使用单信道地面和机载无线电系统 Sincgars-V 系列超短波跳频电台和联合战术信息分布系统 JTIDS。

1.3 地址编码理论概述

用来控制载波频率跳变的地址码序列通常称为跳频序列。在跳频序列控制下,载波频率跳变的规律称为跳频图样或跳频图案。

因此,控制频率跳变的规律有两种表示方法:一种是时频矩阵表示法,如图 1.2 所示,横坐标表示时隙,纵坐标表示频隙,这种方法形

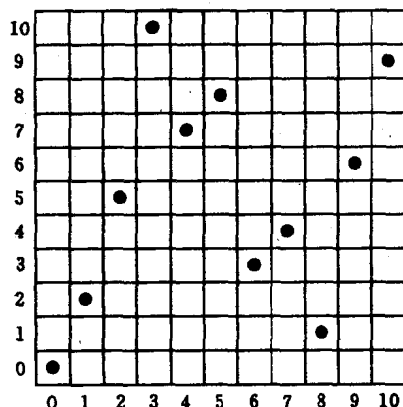


图 1.2 时频矩阵表示法

象直观,通常在表述跳频通信原理或阐述概念时使用;另一种是序列表示法,用符号或数字表示,通常在研究时使用。图 1.2 所对应的序列表示为

$$\{0\ 2\ 5\ 10\ 7\ 8\ 3\ 4\ 1\ 6\ 9\}$$

跳频序列的作用在于:

(1)控制频率跳变以实现频谱扩展;

(2)跳频组网时,采用不同的跳频序列作为地址码,发信端根据接收端的地址码选择通信对象。当许多用户在同一频段同时跳频工作时,跳频序列是区分每个用户的唯一标志。

跳频序列的性能对跳频通信系统的性能有着决定性的影响,如果跳频序列设计得不好,即使跳频通信系统的硬件电路设计得非常出色,也达不到抗干扰的目的。寻求和设计具有理想性能的跳频序列是研究跳频通信系统的重要课题之一。

跳频通信地址编码理论有两方面的内容:一是寻找跳频序列设计时所受到的理论限制;二是设计出达到或接近理论限的跳频序列族。

本节首先给出表征跳频序列性能的重要参数——汉明相关的定义；然后讨论与跳频序列设计有关的两个问题，跳频通信系统的同步方法和组网方式；最后介绍跳频序列设计的一般要求。

1.3.1 跳频序列的汉明相关

在一个战术战场上，分布着许多跳频电台，要做到无相互干扰是相当困难的。由于各用户跳频起始相位的不同和传输延时的差异等原因，在某一时刻，可能有两个或多个用户的信号载频跳到同一频隙上，造成频隙重合干扰，使接收机的解调输出发生误码。频隙重合也称击中或碰撞。表征这一参数的数学术语是汉明相关。

跳频序列的设计主要涉及 4 个参数：频隙数目 q 、序列长度 L 、序列数目 N 以及汉明相关 $H_{\max}$ 。

设有 q 个载频可供跳频，形成频隙集合

$$A = \{f_0, f_1, \dots, f_{q-1}\}$$

长度为 L 的某个跳频序列可表示如下

$$S_v = \{s_v(0), s_v(1), \dots, s_v(j), \dots, s_v(L-1)\}, s_v(j) \in A$$

设跳频网里共有 u 个用户，每个用户采用彼此不同的跳频序列，我们将 u 个用户使用的跳频序列集合记为

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_u\}, u \leq N$$

定义 1.3.1 频隙集合 A 上的长度为 L 的两个跳频序列 $X = \{x(j)\}$ 和 $Y = \{y(j)\}$, $X, Y \in S$, 在相对时延 τ 时的周期汉明相关定义为

$$H_{XY}(\tau) = \sum_{j=0}^{L-1} h[x(j), y(j+\tau)], \quad 0 \leq \tau \leq L-1$$

式中, $x(j), y(j+\tau) \in A$, $(j+\tau)$ 按 $(j+\tau) \bmod L$ 理解, 且

$$h[x(j), y(j+\tau)] = \begin{cases} 1, & \text{若 } x(j) = y(j+\tau) \\ 0, & \text{若 } x(j) \neq y(j+\tau) \end{cases}$$

从定义 1.3.1 可以看出: $H_{XY}(\tau)$ 表示两个跳频序列 X 和 Y 在相对时延为 τ 时, 在一个序列周期里发生频隙重合的次数。显然 $H_{XY}(\tau)$ 越小, 两个跳频序列之间的重合次数就越小, 也就是两个

用户之间的相互干扰就越小。

例 1.3.1 设跳频序列 $X = \{x(j)\} = \{7\ 6\ 5\ 2\ 4\ 1\ 3\}$, 序列 $Y = \{y(j)\} = \{7\ 6\ 4\ 1\ 2\ 5\ 3\}$ 。那么, $\{y(j+5)\} = \{5\ 3\ 7\ 6\ 4\ 1\ 2\}$, 可以将 $H_{XY}(5)$ 求解过程列于表 1.1。

表 1.1 $H_{XY}(5)$ 的求解过程

j	0	1	2	3	4	5	6
$x(j)$	7	6	5	2	4	1	3
$y(j+5)$	5	3	7	6	4	1	2
$h[x(j), y(j+5)]$	0	0	0	0	1	1	0

因此

$$H_{XY}(5) = \sum_{j=0}^6 h[x(j), y(j+5)] = 2$$

从表 1.1 可以看出: 当 $\{y(j)\}$ 循环移位 5 时, 将在第 4、第 5 两个时隙上与 $x(j)$ 发生重合, 即两个不同用户在 4、5 两个时隙同时跳到频隙 4 和频隙 1 上, 可能使解调输出发生误码。

两个跳频序列的重合过程还可以用如图 1.3 所示的时频矩阵来形象地表示。

对于所有的 τ , 重复上述过程, 可得 $H_{XY}(\tau)$ 的值如表 1.2 所示。

表 1.2 $0 \leq \tau \leq 6$ 时 $H_{XY}(\tau)$ 的值

j	0	1	2	3	4	5	6	$H_{XY}(\tau)$
$x(j)$	7	6	5	2	4	1	3	
$y(j)$	7	6	4	1	2	5	3	3
$y(j+1)$	6	4	1	2	5	3	7	1
$y(j+2)$	4	1	2	5	3	7	6	0
$y(j+3)$	1	2	5	3	7	6	4	1
$y(j+4)$	2	5	3	7	6	4	1	0
$y(j+5)$	5	3	7	6	4	1	2	2
$y(j+6)$	3	7	6	4	1	2	5	0

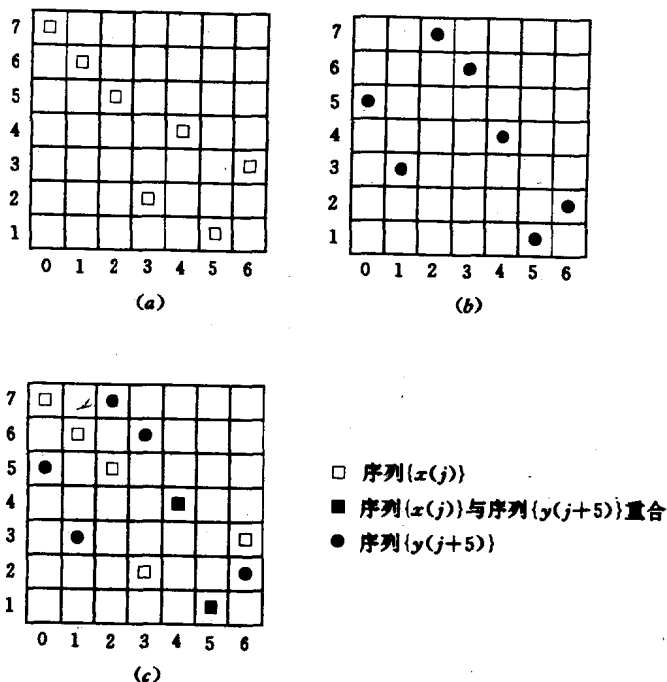


图 1.3 两个跳频序列的重合过程

(a) 序列 $\{x(j)\}$ 的时频矩阵; (b) 序列 $\{y(j+5)\}$ 的时频矩阵;

(c) $\{x(j)\}$ 与 $\{y(j+5)\}$ 的重合。

定义 1.3.2 频隙集合 A 上的长度为 L 的两个跳频序列 $X = \{x(j)\}$ 和 $Y = \{y(j)\}$, $X, Y \in S$, 在相对时延 τ 时的非周期汉明相关定义为

$$AH_{XY}(\tau) = \sum_{j=0}^{L-1} h[x(j), y(j+\tau)]$$

式中, $x(j), y(j+\tau) \in A$, $(j+\tau)$ 不按模运算, 即当 $(j+\tau)$ 不属于集合 $\{0, 1, \dots, L-1\}$ 时, 就令 $h[x(j), y(j+\tau)] = 0$ 。上式可以等效为

$$AH_{XY}(\tau) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{L-1-\tau} h[x(j), y(j+\tau)], & 0 \leq \tau \leq L-1 \\ \sum_{j=|\tau|}^{L-1} h[x(j), y(j+\tau)], & -(L-1) \leq \tau \leq 0 \\ 0, & \tau \text{ 取其他值} \end{cases}$$

例 1.3.2 仍以序列 $X = \{x(j)\} = \{7\ 6\ 5\ 2\ 4\ 1\ 3\}$ 和序列 $Y = \{y(j)\} = \{7\ 6\ 4\ 1\ 2\ 5\ 3\}$ 为例。序列 X 与序列 Y 的非周期汉明相关如表 1.3 和表 1.4 所示。

表 1.3 $0 \leq \tau \leq L-1$ 时 $AH_{XY}(\tau)$ 的值

j	0	1	2	3	4	5	6	$AH_{XY}(\tau)$
$x(j)$	7	6	5	2	4	1	3	
$y(j)$	7	6	4	1	2	5	3	3
$y(j+1)$	6	4	1	2	5	3		1
$y(j+2)$	4	1	2	5	3			0
$y(j+3)$	1	2	5	3				1
$y(j+4)$	2	5	3					0
$y(j+5)$	5	3						0
$y(j+6)$	3							0

表 1.4 $-(L-1) \leq \tau \leq 0$ 时 $AH_{XY}(\tau)$ 的值

j	0	1	2	3	4	5	6	$AH_{XY}(\tau)$
$x(j)$	7	6	5	2	4	1	3	
$y(j)$	7	6	4	1	2	5	3	3
$y(j-1)$		7	6	4	1	2	5	0
$y(j-2)$			7	6	4	1	2	2
$y(j-3)$				7	6	4	1	0
$y(j-4)$					7	6	4	0
$y(j-5)$						7	6	0
$y(j-6)$							7	0

根据非周期汉明相关的定义, $0 \leq \tau \leq L-1$ 时, 有

$$AH_{XY}(\tau) = \sum_{j=0}^{L-\tau-1} h[x(j), y(j+\tau)]$$

$$AH_{XY}(\tau-L) = \sum_{j=L-\tau}^{L-1} h[x(j), y(j+\tau-L)]$$

由此可得

性质 1.3.1 周期汉明相关与非周期汉明相关之间有如下关系

$$H_{XY}(\tau) = AH_{XY}(\tau) + AH_{XY}(\tau-L), \quad 0 \leq \tau \leq L-1$$

并且总有

$$H_{XY}(\tau) \geq AH_{XY}(\tau)$$

$$H_{XY}(\tau) \geq AH_{XY}(\tau-L)$$

因为周期汉明相关总是大于或等于非周期汉明相关, 在以后的讨论中, 除非特别声明, 我们通常从最坏的情况出发, 采用周期汉明相关的定义来对各种跳频序列进行分析, 并且将周期汉明相关简称为汉明相关。同时

$$H(X) = \max_{0 \leq \tau < L} \{H_{XX}(\tau)\}$$

$$H(X, Y) = \max_{0 \leq \tau < L} \{H_{XY}(\tau)\}$$

$$M(X, Y) = \max\{H(X), H(Y), H(X, Y)\}$$

$$H_{\max} = \max_{X, Y \in S} \{M(X, Y)\}$$

式中, $H(X)$ 表示汉明自相关的最大旁瓣, 即序列 X 与其自身平移之间重合次数的最大值, 该参数影响系统的同步性能; $H(X, Y)$ 表示汉明互相关的峰值, 即序列 X 与序列 Y 在任何时延下重合次数的最大值, 该参数影响系统的抗干扰性能和多址组网性能; $M(X, Y)$ 表示两个序列汉明相关的峰值, 即汉明自相关的最大旁瓣 $H(X)$ 、 $H(Y)$ 与汉明互相关峰值 $H(X, Y)$ 三者中的最大值; $H_{\max}$ 表示序列族的最大汉明相关, 它是跳频序列设计中的一个重要参数。

根据上述定义, 不难看出, 例 1.3.1 中, $H(X)=0, H(Y)=0,$